

令和元年5月30日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05262

研究課題名(和文) 海底電磁気観測網を生かしたマントル遷移層内水分分布イメージングの革新

研究課題名(英文) Innovation for the imaging of water in the mantle transition zone using seafloor electromagnetic array data

研究代表者

馬場 聖至 (BABA, Kiyoshi)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：70371721

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、西太平洋域における海底電磁気観測データの蓄積を活かした電気伝導度構造イメージングに基づき、この海域下のマントル遷移層内水分分布を高分解能かつ定量的に推定することを目指して、それに必要なデータ解析技術を革新的に発展させることを目的としている。この目的を達成するため、マントル遷移層に感度の高い周期帯の磁場変動の特徴に注目し、観測された磁場データに含まれる様々な信号を効果的に分離する手法ならびに、電気伝導度構造を推定するためのインバージョン手法において入力する外部磁場変動を複雑な空間分布に対応させる方法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

沈み込む海洋プレートが地球表層からマントル深部への水輸送を担っているのは間違いなく、沈み込まれた側のマントル遷移層にはより多くの水が分布していることが予想される。本研究は、それを観測データから立証しようとするもので、固体地球科学分野における学術的意義は大きい。このような取組の蓄積により、地球の成り立ちと進化についての理解が深まり、一般社会への知の還元とつながる。

研究成果の概要(英文)：This study aims to investigate the distribution of water in the mantle transition zone beneath the western Pacific region using the seafloor electromagnetic observation data collected by our research group in the last decade. For this purpose, we focused on the natural magnetic field variations in the period range that the data is sensitive to the depth of the mantle transition zone, and attempted to develop new analysis methods; 1) separating the complex magnetic field components from the observed data, and 2) incorporating the complex spacial distribution of the magnetic field which is used for the inversion analysis to image the electrical conductivity in the mantle transition zone.

研究分野：海底電磁気学

キーワード：マントル遷移層 電気伝導度 西太平洋 海底電磁気観測 水

1. 研究開始当初の背景

太陽系の惑星の中で地球が有する最大の特徴は、安定した水の存在とプレートテクトニクスの作動である。水は海洋に代表される地球表層だけでなく、固体地球内部にも様々な形（間隙流体、結晶構造に水を含む鉱物、不純物として水を含む鉱物など）で存在する。固体地球内部の水の存在は、物質の流動性、融解温度、元素分配などに重大な影響を及ぼし、マントル対流とその表層への現われであるプレートテクトニクスの維持に寄与してきたと考えられる。高圧実験研究によれば、固体地球内部において最も大量に水を貯蔵し得ると考えられるのがマントル遷移層である（例えば Otani et al., 2004）。したがってマントル遷移層に実際に貯蔵されている水の量を知ることは、地球に存在する水の総量を見積もり、ひいては地球の進化過程の理解を深める上で極めて重要である。

固体地球内部の水の量を 3 次元的な分布として見積もるための現実的なアプローチは、物理学的観測によるリモートセンシングである。その中でも地表・海底での電磁気観測データを用いた電気伝導度構造イメージングは、地球内部の水分布推定の有力な手段として、近年注目されている。マントルを構成する鉱物に溶け込む水は、ごく少量でも全岩の電気伝導度を著しく上昇させる（例えば Wang et al., 2006; Yoshino et al., 2006）。またマントルの岩石は水を含むことにより融点が下がるので、部分熔融を起こして少量でも連結したメルトが生じると、やはり電気伝導度を上昇させる（例えば Ni et al., 2012）。我々は、これらの特徴を利用して、電気伝導度構造モデルからマントル中の水の存否を推定し、関連するダイナミクスの議論を牽引してきた。

電気伝導度構造解析は、磁気圏や電離層における電磁場変動（外部電磁場ソース）が有限の電気伝導度をもつ地球内部に浸透し、電磁誘導により 2 次的電磁場変動を生じる現象を利用する。マントル遷移層を含めた広範囲の 3 次元的な電気伝導度構造の推定は 10 年ほど前から行われ始めた。これまでの研究は、観測点分布の陸上への偏りや計算機性能の不足などが要因となり、いずれも外部電磁場ソースを単純な分布形状に仮定していた。このため得られる構造モデルの解像度は、地球科学的な解釈をするには十分と言えない。最新の研究では、複雑な外部電磁場ソースと電気伝導度構造を同時にインバージョンする手法が開発され、稠密な陸上観測域への適用において高解像度の電気伝導度構造イメージングに成功している（Koch & Kuvshinov, 2013; 2014）。地球表層と内部との間の水の循環の視点に立ってマントル遷移層に運ばれ貯蔵される水の分布を把握するためには、主要なマントル上昇流や下降流の場での稠密な観測データへの適用が必須である。

我々を含む日本の電磁気観測グループは、10 年来複数の観測研究計画を北西太平洋域において実施し、1 年を超える長期の海底電磁気観測データを蓄積してきた（図 1）。陸域の定常地磁気観測点とこれらのデータを合わせると、太平洋プレートが東から西へと沈み込む日本海溝・伊豆小笠原海溝の東西両側を 100 ~ 数 100 km の間隔で面的にカバーする。この観測点分布は、マントル遷移層に感度が高い 1 万 ~ 10 万秒の周期帯の電磁誘導の空間スケールに見合っている。したがってこれらのデータを用いれば、プレート沈み込みの影響を受ける前後のマントル遷移層を適切な解像度でイメージングし、比較することが可能である。

上述のデータの多くを取得した先行研究は、上部マントルに加えてマントル遷移層の 3 次元電気伝導度構造イメージングをも視野に入れた野心的な研究計画であったが、現状では上部マントルのイメージングまでに留まっている。その主要な理由は、先に述べた外部磁場ソースの複雑性を考慮した電磁場応答関数の推定とインバージョン手法が確立していなかったためである。逆に言えば、この現実、これらの問題を解決することがマントル遷移層イメージングのブレイクスルーとなることを示している。

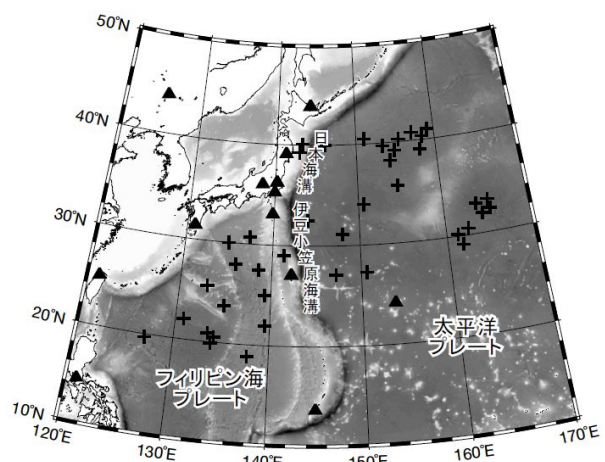


図1. 日本周辺海域において利用可能な1年以上の長期海底電磁気観測点(+)と、データが公開されている陸上の定常地磁気観測点()の分布。

2. 研究の目的

本研究は、電気伝導度構造イメージングに基づき、この地域のマントル遷移層内水分布を高分解能かつ定量的に推定することを目指し、それに必要なデータ解析技術を革新的に発展させるための基礎的研究を行う。このような研究は、申請者らが蓄積してきた世界に誇る海底電磁気観測データベースを最大限に活用することで、他に先駆けて可能となるものである。

3. 研究の方法

本研究を遂行する上で鍵となる外部電磁場ソースの複雑性は、周期 1 万秒～10 万秒で顕著になる。この周期帯では短周期側で卓越する波長が無限大の様な外部磁場ソースに加えて、電離層が太陽によって温められる効果を反映した電流系による波長の短い磁場ソース（地磁気静穏日変動；Sq）や海洋潮汐などに由来する磁場ソースが混合している。これらの磁場ソースは振幅が大きいうえに、振幅には季節変動もあり、卓越周波数を厳密に分離するためには、最低 1 年程度の長期の観測データが必要となる。これらの理由により、従来の電磁場応答関数推定法やインバージョン法がそのままの形では適用できない。そこで以下の手順により研究を進める。

- (1) 北西太平洋の海底電磁気データの統合解析
北西太平洋域で利用可能な海底電磁気観測データは、異なる研究計画で異なる期間に取得されている。一方、陸上の定常地磁気観測データはほとんどの海底観測期間に重複している。全データをコンパイルして見直し、同時期に観測されたデータ区間を整理する。
- (2) 外部電磁場ソースの分離
整理された同時多点観測データの強みを生かすため、多変量解析手法の一つである独立成分分析を適用して、問題の周期帯で混合されている信号を分離する。独立成分分析は、個々の信号が統計的に独立であることを利用して各信号を分離する。上述の外部磁場ソースは、それぞれ独立な物理現象に基づいており、原理的には独立成分分析によって分離することが可能と考えられる。
- (3) 複数外部電磁場ソースのインバージョンへの組み込み
従来の電気伝導度構造インバージョンプログラムを改良し、複雑な分布をとる外部電磁場ソースの入力に対応させる。更には、初期的な電磁場ソース分布を修正しつつ電気伝導度構造を推定するように発展させる。
- (4) 水分布の見積もり
実験的研究により、マントルを想定した様々な温度・圧力・水の量の条件下での鉱物の電気伝導度が測定されている。公表されている実験結果を用い、適切な温度・圧力を仮定して、電気伝導度構造モデルから水分布を推定する。

4. 研究成果

- (1) データの統合解析準備：
北西太平洋域でこれまでに蓄積した海底電磁気アレイ観測データの基礎情報を整理した。またマントル遷移層のイメージングの前段階として、観測アレイごとに上部マントル電気伝導度構造を推定し、論文として公表した（Baba et al., 2017；図 2）。

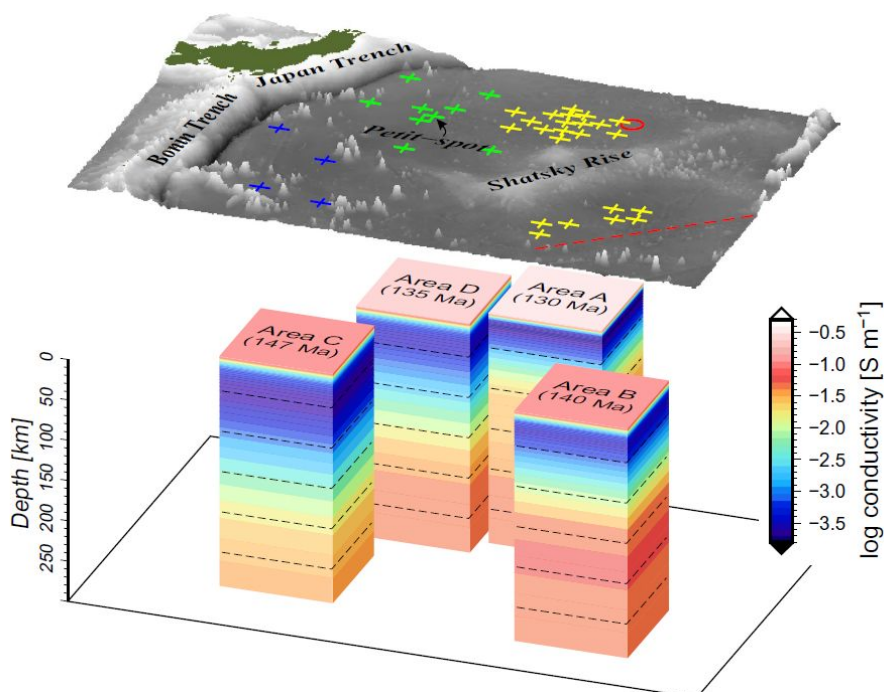


図 2. 北西太平洋の 4 つの海域 (A～D) 下の上部マントル 1 次元電気伝導度構造モデル。

- (2) 外部電磁場ソースの分離：
独立成分分析を海底電磁気アレイデータへ適用し、Sq 様成分を観測データから分離することを試みる。Sq は、電離層が太陽によって温められる効果を反映した電流系によっているので、アレイデータを各観測点の経度にあわせたローカル時間で揃えることにより位相差を考えなくて良いとすると、最も単純な信号混合モデル（信号が時間遅れ無しに混合する）を適用できる。予備的な解析として、フィリピン海で 2005 年 11 月から約 1 年間同時観測した海底磁場データに適用した。各信号の時間変動の特長のほか、パワースペクトルや、混合係数の緯度・経度との相関を参考にして分離信号を解釈することで、定性的には、Sq に関連した成分を特定できたと評価できる結果が得られた。
- (3) 複数外部電磁場ソースのインバージョンへの組み込み：
研究協力者より、磁気圏・電離圏物理学分野で研究されている GAIA モデルを用いて地磁気静穏時日変化（Sq）を再現した結果（Fujita et al., 2018）の提供を受け、Sq 場を入力信号としたインバージョン解析手法を開発した。地球表層の海陸境界と（1）で推定した 1 次元性層構造を組み込んだ電気伝導度構造による電磁誘導効果を計算して、実際に地磁気観測点で測定された磁場値との比較を行った。またインバージョン解析では、このテストモデルを用いて感度計算を行ったところ、この周期帯のデータが深さ 200~400km の構造に最も感度が高いことが分かった（図 3）。

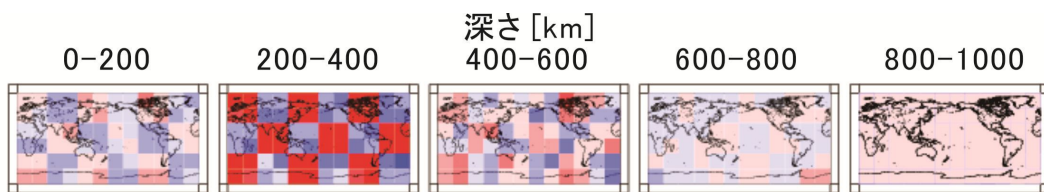


図 3. 人工データのインバージョン解析による感度テスト。赤青の格子柄が明瞭に復元されるほど、データが構造に対して感度が高いことを示す。

- (4) 水分分布の見積もり
上述のデータ解析手法およびインバージョン解析手法の開発と並行し、従来からの解析手法を用いて北西太平洋下のマントル遷移層内 1 次元構造を明らかにした。地震観測データとも併せて解釈した結果、遷移層内の水の量は、せいぜい 0.4wt% であると推定した（Matsuno et al., 2017）。研究期間内では(2)、(3)で述べた新手法を実データへ応用してマントル遷移層内の 3 次元電気伝導度構造と水分分布を明らかにするまでには至らなかったが、引き続き研究を継続し、所期の目的達成を目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

Fujita, S., Murata, Y., Fujii, I., Miyoshi, Y., Shinagawa, H., Jin, H., Fujiwara, H., Evaluation of the Sq magnetic field variation calculated by GAIA, Space Weather, 2018, 16, doi:10.1002/2017SW001745, 査読有。

Baba, K., Tada, N., Matsuno, T., Liang, P., Li, R., Zhang, L., Shimizu, H., Abe, N., Hirano, N., Ichiki, M., Utada, H., Electrical conductivity of old oceanic mantle in the northwestern Pacific I: 1-D profiles suggesting differences in thermal structure not predictable from a plate cooling model, Earth, Planets and Space, 2017, 69, doi:10.1186/s40623-017-0697-0, 査読有。

Matsuno, T., Suetsugu, D., Baba, K., Tada, N., Shimizu, H., Shiobara, H., Isse, T., Sugioka, H., Ito, A., Obayashi, M., Utada, H., Mantle transition zone beneath a normal seafloor in the northwestern Pacific: Electrical conductivity, seismic thickness, and water content, Earth Planetary Science Letters, 2017, 189-198, doi:10.1016/j.epsl.2016.12.045, 査読有。

Ichiki, M., Ogawa, Y., Kaida, T., Koyama, T., Uyeshima, M., Demachi, T., Hirahara, S., Honkura, Y., Kanda, W., Kono, T., Matsushima, M., Nakayama, T., Suzuki, S., Toh, H., Electrical image of subduction zone beneath northeastern Japan, Journal of Geophysical Research, 2015, 120, 7937-7965, doi:10.1002/2015JB012028, 査読有。

〔学会発表〕(計 16 件)

Baba, K., On separation of Sq field and EM response estimation using seafloor array data, 24th Electromagnetic Induction Workshop, 2018.

Koyama, T., Murata, Y., Fujita, S., Fujii, I., Baba, K., Miyoshi, Y., Fujiwara, H., Jin, H., Shinagawa, H., Estimation of electrical conductivity structure of the mantle by using Sq source model of GAIA, 24th Electromagnetic Induction Workshop, 2018.

馬場聖至, 周期帯 $10^4 \sim 10^5$ 秒の MT レスポンス推定について, 第 144 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2018.

小山崇夫, 村田友香, 藤田茂, 藤井郁子, 馬場聖至, 三好勉信, 藤原均, 陣英克, 品川裕之, GAIA Sq モデルを用いたマントル電気伝導度構造の推定, 第 144 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2018.

小山崇夫, 村上朋香, 藤田茂, 藤井郁子, 馬場聖至, 三好勉信, 藤原均, 陣英克, 品川裕之, GAIA Sq ソースモデルによるグローバル電磁誘導計算とマントル電気伝導度構造推定への応用, 第 142 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2017.

馬場聖至, 海底 MT アレイデータと独立成分分析を用いた Sq 成分分離の試み, 第 142 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2017.

Li, R., 清水久芳, 馬場聖至, 歌田久司, Estimation of the seafloor electromagnetic responses in the mixed excitation band by using Sompi Spectral Analysis, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 2017.

Koyama, T., Murata, Y., Fujita, S., Fujii, I., Baba, K., Miyoshi Y., Fujiwara, H., Jin H., Shinagawa, H., Synthetic modeling of global induction by the GAIA Sq source model., IAPSO-IAMAS-IGA Joint Assembly 2017, 2017.

Matsuno, T., Suetsugu, D., Baba, K., Tada, N., Shimizu, H., Shiobara, H., Isse, T., Sugioka, H., Ito, A., Obayashi, M., Utada, H., Mantle transition zone beneath a normal seafloor in the northwestern Pacific: Electrical conductivity, seismic discontinuity, and water content, IAG-IASPEI symposium 2017, 2017.

Matsuno, T., Suetsugu, D., Utada, H., Baba, K., Tada, N., Shimizu, H., Shiobara, H., Isse, T., Sugioka, H., Ito, A., Obayashi, M., Mantle transition zone beneath a normal seafloor in the northwestern Pacific: electrical conductivity, seismic thickness, and water content, 23rd Electromagnetic Induction Workshop, 2016.

Baba, K., Estimating volatile content in oceanic upper mantle from magnetotelluric observations, Goldschmidt Conference 2016, 2016.

Baba, K., Tada, N., Matsuno, T., Shimizu, H., Zhang, L., Liang, P., Utada, H., Thermal and compositional constraints on the upper mantle beneath the northwestern Pacific imposed by marine magnetotellurics, EGU General Assembly 2016, 2016.

Matsuno, T., Suetsugu, D., Utada, H., Baba, K., Tada, N., Shimizu, H., Shiobara, H., Sugioka, H., Ito, A., Mantle transition zone beneath a normal seafloor in the northwestern Pacific: Electrical conductivity, seismic discontinuity, and water content, EGU General Assembly 2016, 2016.

小山崇夫, 清水久芳, 高次モードの外部磁場ソースに対する 3 次元不均質球体電磁誘導モデリング, 第 140 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2016.

Koyama, T., Fast and memory saved 3-D forward modeling code by using the contracting integral equation (CIE) method, Magnetotelluric 3D Inversion Workshop III, 2016.

Matsuno, T., Suetsugu, D., Utada, H., Baba, K., Tada, N., Shimizu, H., Shiobara, H., Isse, T., Sugioka, H., Ito, A., The amount of water reserved in a "normal" oceanic mantle transition zone beneath the northwestern Pacific, inferred from data of coincident ocean bottom electromagnetic and seismic observations, AGU 2015 fall meeting, 2015.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名 : 小山 崇夫
ローマ字氏名 : (KOYAMA, Takao)
所属研究機関名 : 東京大学
部局名 : 地震研究所
職名 : 助教
研究者番号 (8 桁) : 00359192

(2) 研究協力者

研究協力者氏名 : 藤井 郁子
ローマ字氏名 : (FUJII Ikuko)
研究協力者氏名 : 藤田 茂
ローマ字氏名 : (FUJITA Shigeru)
研究協力者氏名 : 松野 哲男
ローマ字氏名 : (MATSUNO Tetsuo)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。